

迴圈天線微型化之設計與效果

施彥閻*、廖文照、葉俊廷
國立臺灣科技大學電機工程學系

摘要 — 本論文提出一款微型化的迴圈天線，使用的微型化技巧包含向迴圈內部添加蜿蜒線段，以延長其電流路徑，產生的效果相當於增加其電感，微型化後的設計，其輻射效率可維持在 87%~92%。另一種使用的微型化技巧，是在其迴圈路徑上加入串聯之電感元件，以達到進一步縮減天線尺寸的效能。迴圈天線設計首先使用電磁數值軟體進行模擬，測試不同蜿蜒路徑長度、電感數量與電感值的效果。透過實作與量測，驗證具蜿蜒迴路與串聯電感元件的迴圈天線，可在不影響場型、犧牲部分頻寬與輻射效率的情況下，大幅將迴圈天線之共振頻率縮小，達到不錯的微型化效果。

一、微型化的天線需求

近年來由於行動應用裝置的大量需求，且功能趨向多元化，例如利用手機觀看數位電視、接收衛星訊號、利用 WIFI 無線上網、無線射頻辨識系統(RFID)以及近場通訊(NFC)功能等。觀察現今資通訊產業的發展趨勢，可以發現負責發射及接受電磁波訊號功能的天線，在產品設計上佔有一席之地。對於尺寸有限的行動裝置，更有要將其縮小化以節省體積的需求。但天線若要有效地接收電磁波訊號，其長度至少需達四分之一個波長。受限於物理限制，我們選擇了在不增加其面積情況下，增加一些物理結構或添加集總電路元件，增加其電氣長度，以達到降低其操作頻率的效果。參考[1]、[2]中，提出有數種方式可達到微型化天線之技術，我們利用蜿蜒結構與集總元件負載的方法來嘗試。

傳統的微型化方法之一為在天線結構中加入介電負載(dielectric loading)，縮小天線達成共振所需的電氣長度，但此方法可能引入例如表面波與介電共振等不利天線操作的機制。此外還會增加天線的體積與重量。[1-3]中提到可使用集總元件來達到微型化，加入電抗元件可免除介電負載或磁性負載的使用，直接增加天線上的等效電感、電容值。以電感負載為例，常見的有以 helix 或 meander line[4]、[5]來實施。本論文選擇以增加電感負載的方式，嘗試將天線進行微型化。

二、天線設計

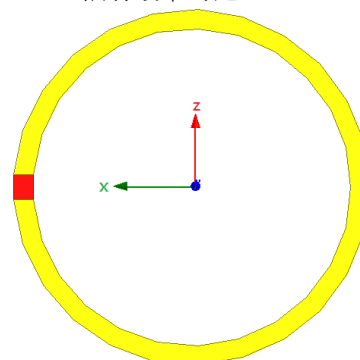
2.1 單純迴圈天線

為了實現一具有微性化特性的迴圈天線，需要建立數組不同模型以利對照，故使用全波模擬軟體 HFSS 進行天線之模擬。首先考慮一不加入任何結構的單純迴圈天線，用以作為效能比較的參考天線。

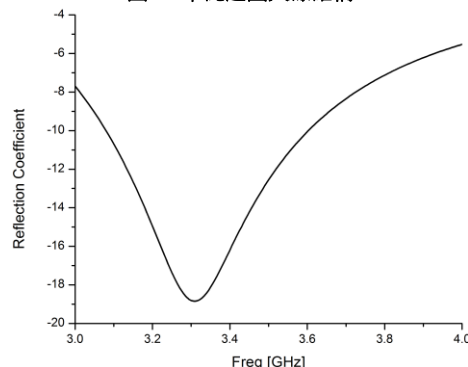
圖一中所示的迴圈天線，其內外徑分別為 12.5 及 14 mm，周長約為 85 mm。左側的小矩形為饋入結構，尺寸

為 $1.5 \times 2 \text{ mm}^2$ ，使用 0.8 mm 的 FR4 基板，模擬所得到的反射係數如圖二，其 -10 dB 頻寬為 3.07 GHz~3.58 GHz，頻寬百分比為 15.7%。由於中心頻率 3.3 GHz 的波長約與迴圈周長相當，可推斷該結構是利用整個迴圈，產生約一個波長的共振模態。模擬設定之輸入阻抗為 100Ω ，原因是利用一個波長輻射之迴圈天線，其阻抗約略大於半波長偶極天線的 73Ω 。

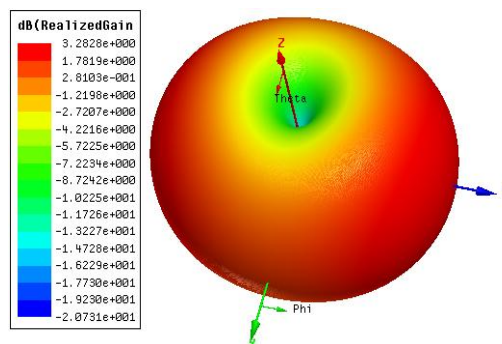
圖三顯示該設計的 3D 輻射場型與增益，可發現由於饋入結構方向之緣故，此迴圈天線之 3D 場型表現就像一立於 z 軸之偶極天線，故其在 xy 平面具有全向性輻射，最大增益為 3.2 dBi，輻射效率可達 98.6%。



圖一：單純迴圈天線結構



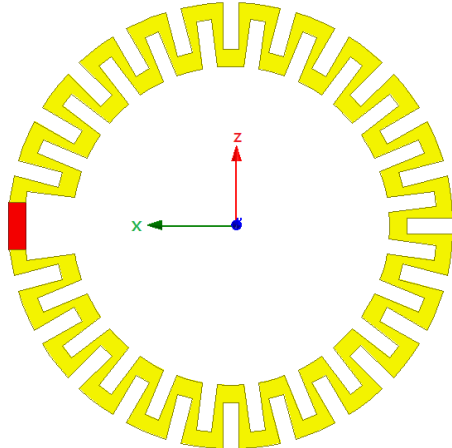
圖二：單純迴圈天線之反射係數



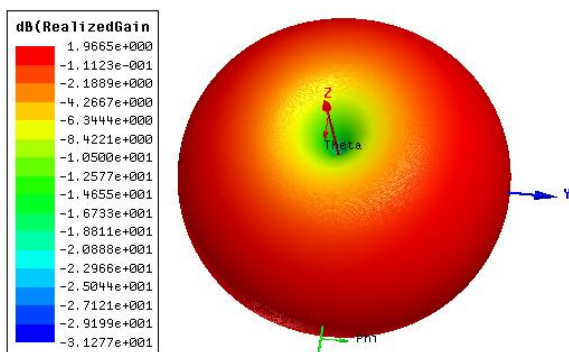
圖三：單純迴圈天線之 3D 輻射場型及增益

2.2 加入蜿蜒結構之迴圈天線

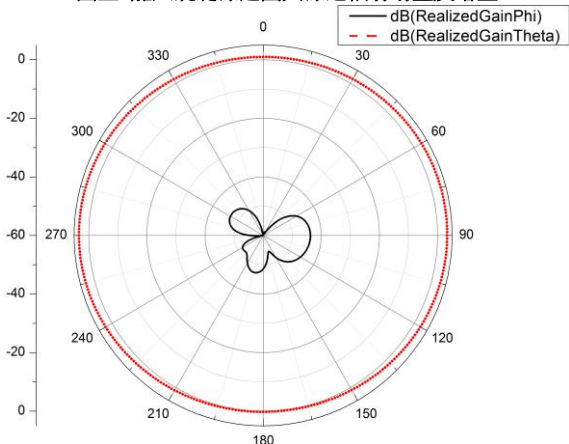
參考先前研究之利用蜿蜒結構，延長共振路徑，達到降低操作頻率效果的方法，將單純的迴圈天線加入蜿蜒結構，以延長其共振路徑。修改後的結構如圖四所示，其內外徑分別為 10 及 14 mm。經模擬發現其共振頻率往低頻移動至 2.45 GHz，頻寬百分比則從原來的 15% 變為 5%。不過天線的輻射場型不會改變。圖五顯示輻射場型中的最大增益為 1.96 dBi，輻射效率仍保持在 92.7%。另觀察圖六中的 xy 平面的之 E_θ 、 E_ϕ 分量圖，其電場分布主要為 E_θ 成分亦可驗證該天線雖然共振路徑達到一個波長，但主要輻射結構仍為集中在饋入點附近的電流。



圖四:加入蜿蜒線之迴圈天線結構

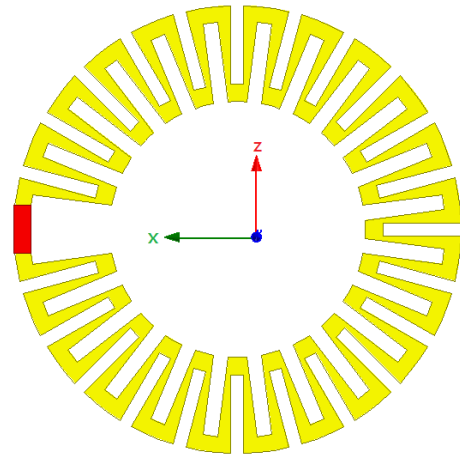


圖五:加入蜿蜒線迴圈天線之輻射場型及增益



圖六:加入蜿蜒線迴圈天線之 E_θ 與 E_ϕ 分量場型

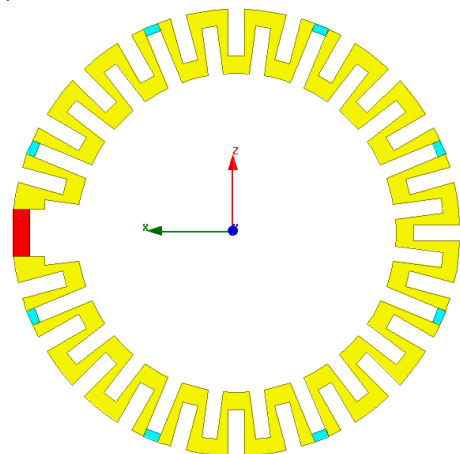
為了進一步驗證該方法的可行性。再次設計了有更長路徑之迴圈天線如圖七，其內外徑分別為 8 及 14 mm，發現其共振頻率從原始的 3.3 GHz 下降至 2.02 GHz，頻寬百分比維持在 5%，場型與其他先前設計相近，最大增益達 1.76 dBi，輻射效率為 87%，顯示出此微型化方法的可行性。



圖七:擁有更長路徑之迴圈天線

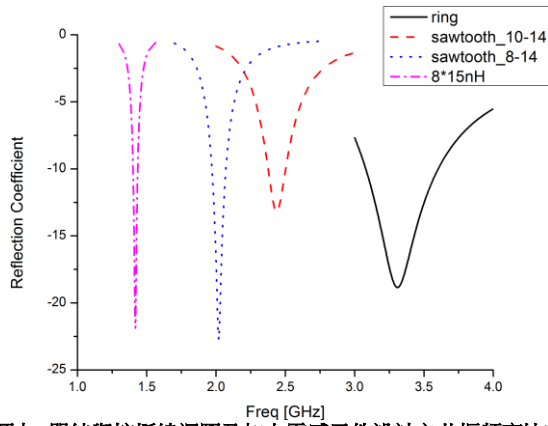
2.3 在蜿蜒迴圈天線上加入電感元件

先前研究中[1-3]、[6]、[7]提出可加入電抗性負載達到微型化的效果，我們試著將電感元件加入至此蜿蜒結構中。圖八為加入 8 個電感元件之結構圖，以串聯型式排列，電感尺寸為實際可取得之集總元件的 $1 \times 0.5 \text{ mm}^2$ [8]，使用的電感值為可取得的 15 nH 電感元件。可發現其共振頻率從原始未加入電感的 2.45 GHz 降低至 1.42 GHz，頻寬百分比則由 5% 變為 2.3%，其場型依然如立於 z 軸之偶極天線，其最大增益可達 2.35 dBi，輻射效率約為 79%。

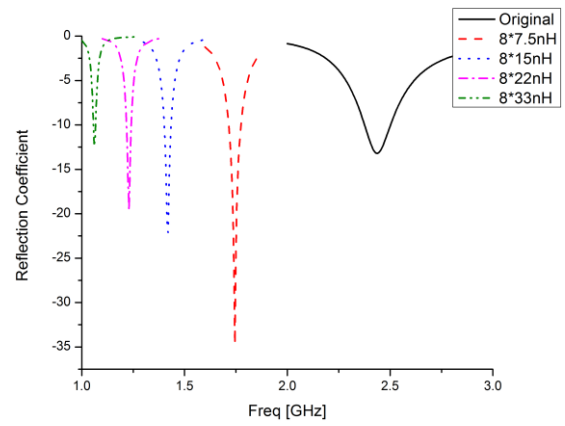


圖八:於蜿蜒迴圈天線加上電感元件之天線結構

圖九比較了原始的迴圈天線、加入蜿蜒結構，以及再加上電感元件後等設計的反射係數頻譜，顯示出這二種作法皆能降低天線的共振頻率，且不影響其場型。除了頻寬百分比外，其增益及輻射效率皆不會下降太多。



圖九: 單純與蜿蜒線迴圈及加上電感元件設計之共振頻率比較

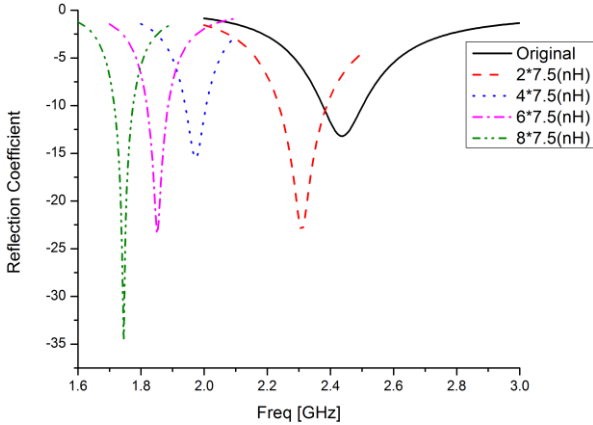


圖十一: 加上電感之蜿蜒線迴圈設計在相同電感數量、不同總電感值之共振頻率比較

三、具電感元件迴圈天線的參數分析

3.1 電感數量之影響

為找出決定共振頻率偏移的主要參數，首先固定電感值，以改變電感數量的方式模擬。結果顯示加入的電感數量越多，可使共振頻率往更低頻移動，如圖十所示。表 I 列出了各數量的共振頻率、-10 dB 頻寬、最大增益以及效率。



圖十: 加上電感之蜿蜒線迴圈設計在相同總電感值、不同電感數量之共振頻率比較

表 I: 不同電感數量設計之蜿蜒式迴圈天線特性比較

	共振頻率 (GHz)	-10dB 頻寬 (MHz)	最大增益 (dBi)	效率 (%)
No L	2.45	121	1.9	92
2x7.5(nH)	2.3	149	2	90
4x7.5(nH)	1.96	68	1.45	86
6x7.5(nH)	1.85	67	1.4	85
8x7.5(nH)	1.75	60	1.2	84

3.2 電感值之影響

另外也嘗試在數量相同的情況下，改變電感值，進行參數分析。結果發現加入的電感值越大，共振頻率亦會往低頻移動，如圖十一所示。但伴隨而來的是頻寬百分比與輻射效率的下降，由模擬結果可發現當加入 8 個 33 nH 之電感後，其頻寬百分比、輻射效率分別已降至 1% 及 51%。表 II 為模擬結果之整理。

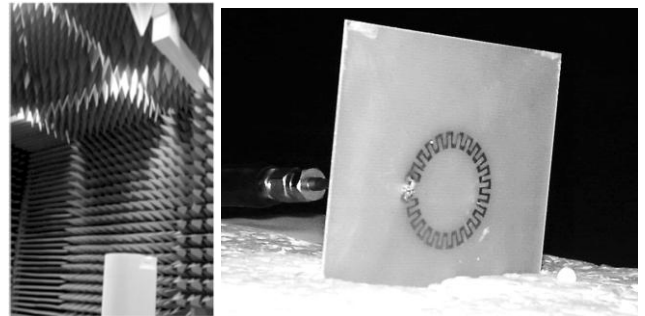
表 II: 不同電感值設計之蜿蜒式迴圈天線特性比較

	共振頻率 (GHz)	-10dB 頻寬 (MHz)	最大增益 (dBi)	效率 (%)
No L	2.45	121	1.9	92
8x7.5(nH)	1.75	60	1.2	84
8x15(nH)	1.41	33	0.2	74
8x22(nH)	1.23	22	-0.7	67
8x33(nH)	1.06	11	-1.1	51

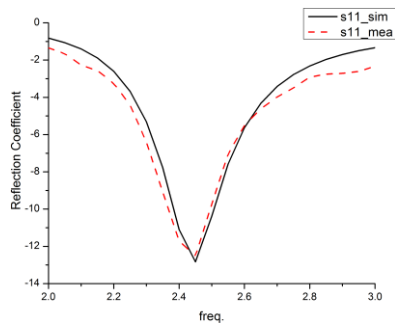
在本設計中我們加上的電感是以串聯的方式在天線結構中排列，故其總電感為各電感元件之總和。上述模擬中，若使用 8 顆 7.5 nH 的電感，其總電感為 60 nH，其共振頻率為 1.74 GHz；而若使用 4 顆 15 nH 的電感，其總電感亦為 60 nH，共振頻率則為 1.65 GHz。這兩例的結果非常相近；另一例子是使用 8 顆 33 nH 電感，其共振頻率為 1.06 GHz，而改作 4 顆 66 nH 電感的共振頻率為 0.93 GHz，且增益與輻射效率皆不會相差太多，故推斷總電感為決定共振頻率偏移多寡及影響頻寬、輻射效率的主要因素。

四、天線實際製作、量測

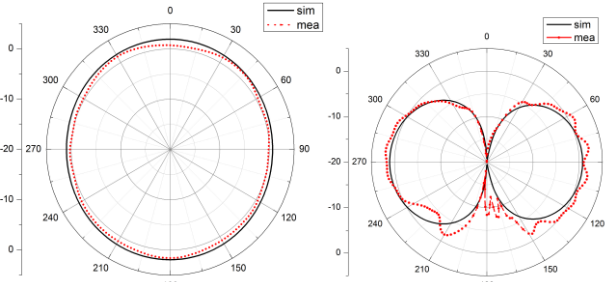
圖十二中是實際製作之蜿蜒迴圈天線，是使用 0.8 mm 之 FR4 基板製作，其介電常數為 4.4，介電損耗為 0.02，並以同軸電纜饋入訊號。該天線放置於無反射實驗室中進行量測。圖十三中顯示了模擬與量測的反射係數頻譜。共振頻率都落在 2.45 GHz。而圖十四中的輻射場型結果也相當一致，其輻射效率為 86.9%，最大增益值為 2.4 dBi，結果大致符合預期。



圖十二: 實際於台科大無反射實驗室中量測 3D 場型

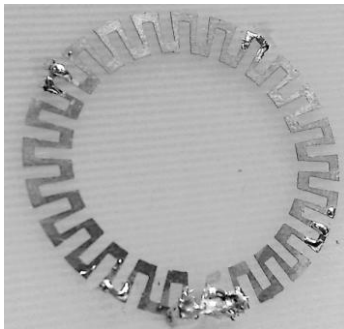


圖十三: 蜿蜒迴圈天線之模擬與量測反射係數



圖十四: 蜿蜒迴圈天線模擬與量測之平面場型圖

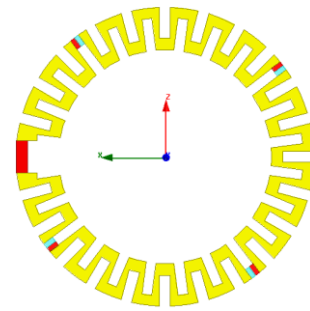
圖十五為在蜿蜒迴圈天線焊上 4 個 15 nH 電感之實體照，由於模擬之饋入端乃為理想狀態，而實際人工製程上較不易完美製作，焊錫處具有阻抗，且電感本身也含有內阻，這些因素皆可能產生損耗，因此在模擬結構中建置電阻模型如圖十六所示，深色方塊為 μ Rata-0402 之 15 nH 電感，淺色方塊其電阻值設為 5Ω ，經由模擬得知共振頻率依然為 1.65 GHz，但其最大增益由 0.74 dBi 降為 -1.3 dBi，輻射效率降低了 20%。由此可見實際製程之誤差不容忽視。相較於模擬結果，實測之匹配與輻射效率較差，圖十七與圖十八比較了模擬與量測的反射係數與場型圖，共振頻率相較於模擬約有 6% 之偏移；最大增益分別為 -1.3 dBi 與 -1.6 dBi，輻射效率則為 53% 與 29%。



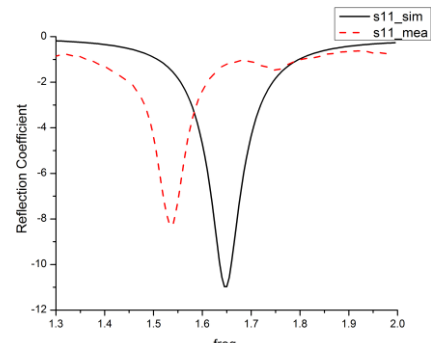
圖十五: 於蜿蜒迴圈天線加上 4 個 15nH 電感之實體照

五、結論

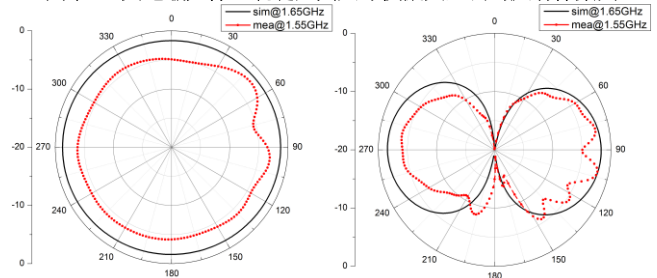
本論文提出了將迴圈天線向內蜿蜒以延長其電氣路徑、並加入電感元件使共振頻率進一步往低頻移動，且不影響場型表現之方法，實現了微型化天線之目的。惟電感誤差與實作上的困難使得天線的輻射效率表現不如預期。且使用較大電感值後，必須付出頻寬與效率下降的代價，但該型式天線所具有的微型化優勢，仍有在窄頻的通訊規格上應用之價值。



圖十六: 結合電阻與電感結構之蜿蜒迴圈天線



圖十七: 具電感元件之蜿蜒迴圈天線模擬與量測的反射係數圖



圖十八: 具電感元件之蜿蜒迴圈天線模擬與量測之 xy 平面場型圖

參考文獻

- [1] M. Lee, C.-C. Chen, and J. L. Volakis, "Ultra-wideband antenna miniaturization using distributed lumped element loading," in *Proc. of 2005 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, pp. 549-552.
- [2] C.-C. Chen, B. A. Kramer, M. Lee, and J. L. Volakis, "Miniature UWB antenna design and its limitations," in *Proc. of First European Conference on Antenna and Propagation*, Nice, France, pp. 1-3, Nov. 2006.
- [3] M. Lee, B. A. Kramer, C.-C. Chen, and J. L. Volakis, "Distributed lumped loads and lossy transmission line model for wideband spiral antenna miniaturization and characterization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 10, pp. 2671-2678, Oct. 2007.
- [4] S. R. Best, "A discussion on the properties of electrically small self-resonant wire antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, issue 6, pp. 9-22, Dec. 2004.
- [5] S. R. Best, "On the resonant properties of the Koch fractal and other wire monopole antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 1, issue 1, pp. 74-76, 2002.
- [6] J. L. Volakis, C.-C. Chen, J. Halloran, and S. Koulouridis, "Miniature VHF/UHF conformal spirals with inductive and ferrite loading," in *Proc. of 2007 IEEE Antennas and Propag. Soc. Int. Symp.*, pp. 5-8.
- [7] B. A. Kramer, C.-C. Chen, and J. L. Volakis, "Some basic guidelines for miniaturizing UWB antennas," in *Proc. of 2008 IEEE Antennas and Propag. Soc. Int. Symp.*, pp. 1-4.
- [8] MuRata Innovator in electronics, *Chip Inductors (Chip Coils)*, pp. 126, Oct. 1, 2012.